

液晶層を評価する新しいセナルモン法

佐藤 裕哉*・中村 勇夫**・堀井 信宏***
佐藤 松雄****・関 秀廣*****

New Senarmont Method for Evaluation of Liquid Crystal Layer

Yuya SATO*, Isao NAKAMURA**, Nobuhiro HORII***,
Matsuo SATO**** and Hidehiro SEKI*****

Abstract

Liquid crystal displays (LCDs) are widely used in many fields for high performance, such as low power consumption, high contrast and high durability. The precise design of electro-optical performance and the controllability of the manufacturing achieve the demand. Measurement of the retardation is one of the important evaluation technologies. It is closely related to the contrast, the viewing angle, the response speed and so on. A newly developed Senarmont method is proposed. This method gives more precise measurement accuracy and is useful for the development of the LCDs performance.

Key words: liquid crystal display, Senarmont method, retardation, extinction angle

1. はじめに

現在、フラットパネルディスプレイの市場は急速に成長しており、CRT ディスプレイを凌ぐ勢いである。特に液晶ディスプレイ (LCDs) はフラットパネルの中で最も技術的に確立された電子表示デバイスであり、薄型、軽量、低消費電力などの優れた特徴を有しているために需要は拡大してきており、2010 年には小型のものから大型ディスプレイまで 1 千億ドルの売り上げが見込まれている。今後大画面ディスプレイを満足させるには更なる性能の向上と生産技術の拡大が必要となる。

これらの要求を達成するために評価技術は不可欠であり、中でもリタデーションの測定は重要な評価技術の 1 つである。リタデーション値はコントラスト、視野角、応答速度などと密接な関係がある。通常リタデーションの測定には干渉法が用いられるが、この測定法は予め屈折率の波長特性を知っておく必要がある。

これに対して、セナルモン法 [1] は検光子を回転させ、消光位を求めることでリタデーション値を算出することが出来るため、非常にシンプルで高精度の測定法といえる。また、この測定法は測定角の 1 度の誤差がリタデーション値では 3.5[nm] に相当するため、どれだけ正確な角度(消光位)が得られるかが最重要課題になる。また、リタデーション値の誤差は直接コントラストの悪化に影響を与えるため高精度での測定可能な技術が求められる。

平成 16 年 12 月 17 日受理

* 大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程・2 年

** 大学院工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程・3 年

*** 大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程・2 年

**** 機械情報技術学科・教授

***** 電子知能システム学科・教授

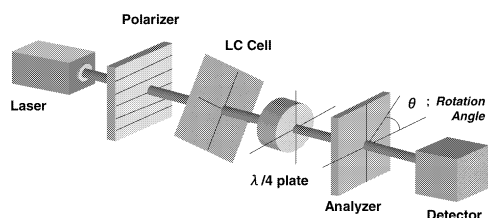


Fig. 1 従来型セナルモン法の光学系

2. 従来のセナルモン法

セナルモン法は液晶セルのリタデーション測定には欠かせない測定法の一つである。Fig. 1 にこの基本構成を示す。2枚の偏光子の間に測定したい試料と測定波長に合わせた $\lambda/4$ 板を組み込み、出射側の偏光子を回転させ暗状態になる角度（消光位）を求め、この値からリタデーションを算出することができる手法である。この測定方法は簡便な光学系での測定が可能であることや、比較的精度良く測定出来ることから液晶のリタデーションや膜厚の測定など、広く使われてきた測定法である。

従来型リタデーション測定法で構築した光学系のジョーンズベクトルを次式に示す。

$$(\mathbf{E}) = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma}{2} & i \sin \frac{\Gamma}{2} \\ i \sin \frac{\Gamma}{2} & \cos \frac{\Gamma}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

\mathbf{E}_x は偏光の x 成分, \mathbf{E}_y は偏光の y 成分, Γ は液晶の位相差, θ は検光子の回転角度, そして λ は波長を示している。また, この式で右辺第1項は検光子, 第2項は $\lambda/4$ 板, 第3項は液晶のジョーンズマトリクス, 第4項は入射する光の偏光を表すジョーンズベクトルである。また, \mathbf{E} の絶対値の2乗は透過光強度 T に対応しており, 次式で与えられる。

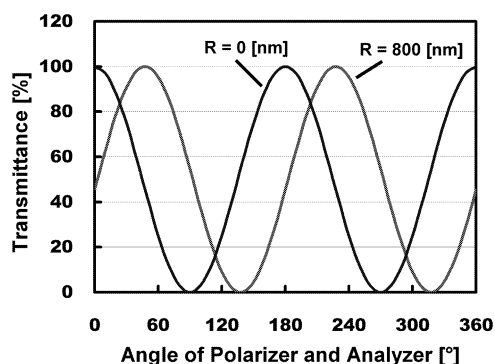


Fig. 2 検光子の回転角と透過光強度特性（理論値）

$$T = |\mathbf{E}_x|^2 + |\mathbf{E}_y|^2 = \cos^2 \left(\frac{\Gamma}{2} - \theta \right) \quad \dots (2)$$

よって, この式が次の位置で消光位を示す。

$$\theta = \frac{\pi R}{\lambda} + m\pi \quad m=0, 1, 2, 3, \dots \quad \dots\dots (3)$$

ここで R はリタデーション値であり, 次のように求められる。

$$R = \frac{\lambda \theta}{\pi} - m\lambda \quad m=0, 1, 2, 3, \dots \quad \dots\dots (4)$$

Fig. 2 に従来のセナルモン法を用いて検光子を回転させたときの透過光強度特性(理論値)を示す。パラメータはリタデーション R である。測定波長は測定に用いる光源 He-Ne Laser を考慮して 632.8 nm と仮定した。このように従来法を用い検光子を 360 度回転させると, 2 点の消光位を得られることが分かる。

また, Fig. 2 に示すように透過光強度の波形は位相差板を組み込んでいない状態と比べ, $\Gamma/2$ 分だけ正の方向へシフトするので, 消光する検光子の角度からリタデーションを算出することができる。Fig. 3 は波長 632.8 [nm] を用いたときの消光位とリタデーションの関係を示したものである。この図から消光位の角度が 1 度異なるとリタデーション値では約 3.5 [nm] ずれることが分かる。現在では 1 [nm] 以下の測定精度が求められているが, この精度を満たすためには消光位を 0.28 度の精度で求めることが

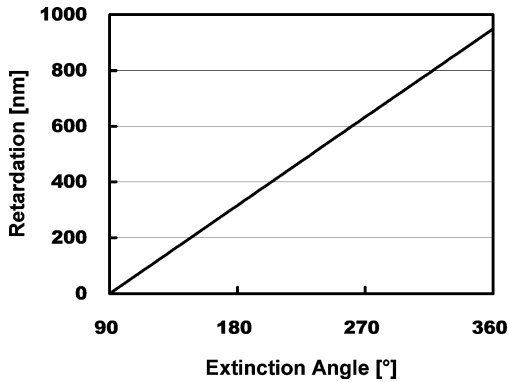


Fig. 3 消光位とリタレーション値の関係（理論値）

必要となる。そこで我々はリタレーション測定で広く用いられているセナルモン法を応用することで、更に測定精度を向上させることが可能な新しいリタレーション測定法について検討した。

3. 測定精度

測定の精度を向上させるために誤差の検討を行った。誤差は系統誤差と偶然誤差に分けられる。系統誤差は機械的誤差（機器の特性）、物理的誤差（温度、湿度、測定時の条件等）、そして測定する人物の個人誤差など、一定の条件下で一定の誤差が生じるという関係がはっきりしている誤差である。それに対し偶然誤差は機器の動揺や読み取り誤差など誤差の発生がランダムなものを示す。この偶然誤差は観測の繰り返し等で少なくすることが可能であるため、一般的には確率変数として扱い、統計的な手法、つまり平均化することによって真値に最も近い推定値を求める。また、系統誤差の小さいものを比較的正確、偶然誤差の小さいものを比較的精密と称し、解析の分野では精密さを精度と定義している。すなわち、測定精度とは偶然誤差によるものであり、この偶然誤差を少なくすることにより精度の向上が図られる。

セナルモン法も同様に消光角を読み取る精度

が測定波形（ $T = \cos^2 \theta$ ）に大きく依存する。偶然誤差の場合、読み取り誤差をより少なくするためには測定の点数を多くすることで真値に近づいた値が得られる。そこで本論文ではこの観点から検討を行った。

4. 新しいセナルモン法

セナルモン法では消光角を読み取る精度が測定精度に大きく影響するため、読み取り誤差をより少なくすることが可能な光学系構築の検討を行った。その解の一つが反射型の光学系である。次式に反射型測定法についてジョーンズマトリクス表示を示す。

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma}{2} & -i \sin \frac{\Gamma}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma}{2} & \cos \frac{\Gamma}{2} \end{pmatrix} \\
 &\begin{pmatrix} e^{i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \\
 &\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \\
 &\begin{pmatrix} e^{i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma}{2} & i \sin \frac{\Gamma}{2} \\ i \sin \frac{\Gamma}{2} & \cos \frac{\Gamma}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &\dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

この測定法の光学系は9つの行列によって表すことができる。入射側から偏光子、液晶セル、 $\lambda/4$ 板、検光子を組み込み、検光子を回転させる所までは従来法と同じではあるが、本測定法では検光子の後ろに鏡を置くことで透過光はもう一度逆方向から検光子、 $\lambda/4$ 板、液晶セルを通り、入射側の偏光子と偏光軸が90度異なった方向に偏光するものである。中央の行列は鏡の反射効果を表している。新しい測定法のジョーンズマトリクスを用いて光学特性の評価を行った。透過光強度 T の理論式を次式に示す。

$$T = |E_x|^2 + |E_y|^2 = \frac{1}{4} \sin^2(2\theta - \Gamma) \dots (6)$$

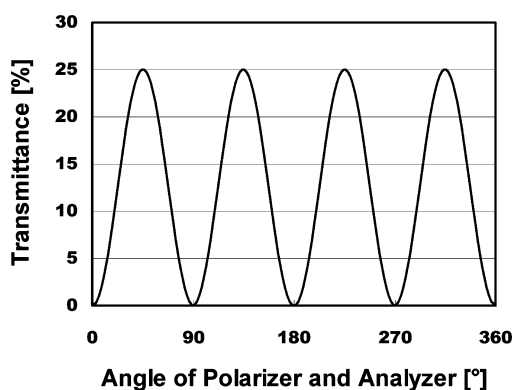


Fig. 4 新しい測定法の透過光強度の検光子回転角依存性 (理論値)

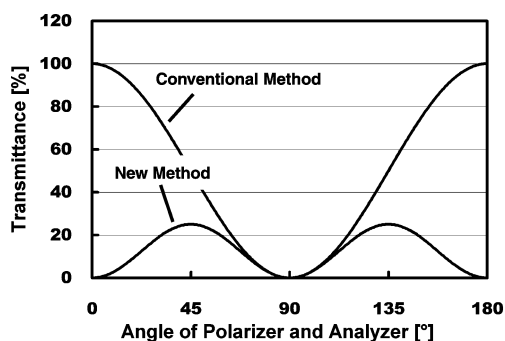


Fig. 5 従来法と新しい測定法の透過光強度特性の比較 (理論値)

以上の結果, 消光位 θ は次式によって得られる。

$$\theta = \frac{\pi R}{\lambda} + \frac{1}{2} m \pi \quad m=0, 1, 2, 3, \dots \quad \dots (7)$$

新しい測定法について透過光強度の検光子回転角依存性を示したものを Fig. 4 に示す。従来法では検光子を 360 度回転させると 180 度周期でピーク (極大値) とボトム (極小値) が 1 点ずつ現れていたが, 本測定法では透過光強度は $\cos^2 \theta \sin^2 \theta$ の特性を示すため, ピークとボトムをそれぞれ 2 点ずつ求められることができる。これは従来法ではピークとなっていた点も消光位になり 180 度周期が 90 度周期に変わったことを意味する。

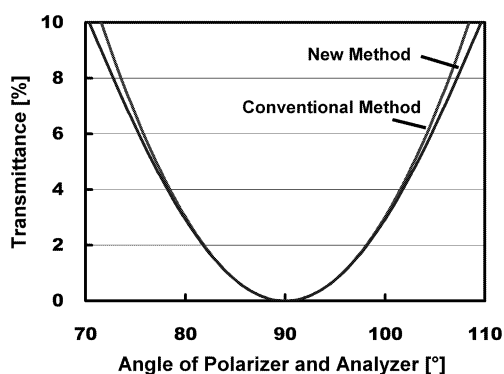


Fig. 6 2つの測定法の測定比較 (理論値)

次に従来法と反射型の透過光強度を比較した結果を Fig. 5 に示す。新しい測定法は従来型に比べ透過光強度のピークが 1/4 に落ちてしまうため, 測定波形の振幅が小さく, 緩やかなものになっている。このため極値から離れるに従い透過光強度に開きが生まれるので, 測定精度の低下が懸念される。しかし, Fig. 6 に示すように測定において最も重要視される消光方位から ± 10 度程度では従来法・反射型ともほぼ同じ値を示している。反射型では $\cos^2 \theta$ の波形と $\sin^2 \theta$ の波形を掛け合わせた波形が得られる。一方の項がボトムの場合を考える。他の項はほぼ 1 で角度依存性が少ない。したがってボトムの項が支配的になり, 従来法と変わらない特性が得られる。このことから, 反射型において消光位を求める測定精度は透過型と同等となる。

6. 測定法の比較

このコンセプトを実験的に裏付けるため Fig. 7 に示すような光学系を構築し検討を行った。光源には波長が 632.8 [nm] の He-Ne Laser, 偏光板にはグランレーザプリズムを用いた。パラレルニコルとクロスニコルの透過率の比を消光比として求めたところ 1×10^5 以上であることが確認され, 今回の実験における測定系としては十分に満足しうる精度が得られた。

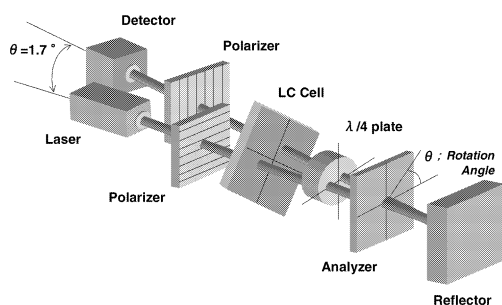


Fig. 7 新しいセナルモン法の光学系

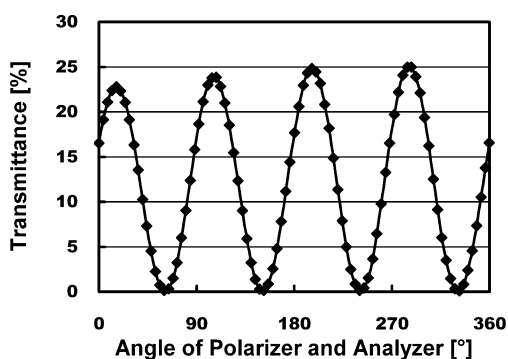


Fig. 9 新しい測定法の透過光強度の検光子回転角依存性（実験結果）

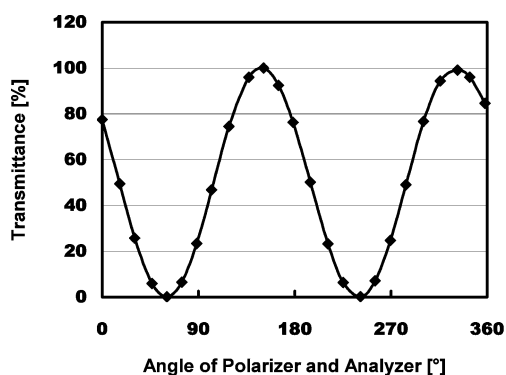


Fig. 8 従来法の透過光強度の検光子回転角依存性（実験結果）

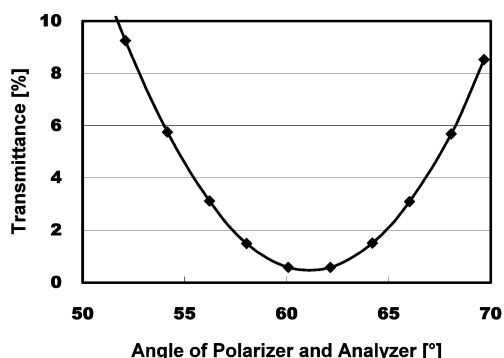


Fig. 10 新しい測定法の測定結果（消光位付近）

まず始めに従来のセナルモン法を用いて測定した透過光強度の検光子回転角依存性を Fig. 8 に示す。透過光強度は最大値を 1 と規格化した。検光子を 360 度回転させることで透過光強度は $\cos^2\theta$ のカーブを描いておりピークとボトムはそれぞれ 2 点ずつ求めることができた。

次に新しく提案した測定法を用いて同じ試料 ($R=530$ [nm]) を測定した場合の透過光強度の検光子回転角依存性を Fig. 9 に示す。こちらも検光子を回転させることで透過光強度は変化するが、透過光強度は先に述べた反射型の理論式のように $\cos^2\theta\sin^2\theta$ の波形を描いており、90 度周期でピークとボトムが現れ、消光位を 4 点得られることが分かる。このとき光源と光検知器の構造上、入射側の光と出射側の光は 1.7 度傾いた光学系を用いた。この新しい測定法にお

いて光が試料内で 1.7 度傾くとするリタデーション値で 0.24 [nm] の測定誤差が生じてしまう。しかし、通常設計される液晶ディスプレイのリタデーション値は 750 [nm] 程度 (屈折率異方性: $\Delta n=0.15$, 液晶層の厚さ: $d=5$ [μm]) であるため、セル厚では 1.67 [nm] の誤差に対応する。このことを考慮すると、Fig. 7 の光学系を用いても十分な測定精度が得られると考える。Fig. 10 は消光位付近を拡大したものであり、消光位が精度良く求められることが分かる。

次に、新しい測定法によって得られた特性から消光位を求める方法について検討を行った。その結果、消光位は $\theta=60.45, 150.20, 240.44, 330.45$ [$^\circ$] と求められた。このことからリタデーション値は 528.95 [nm] であると算出され

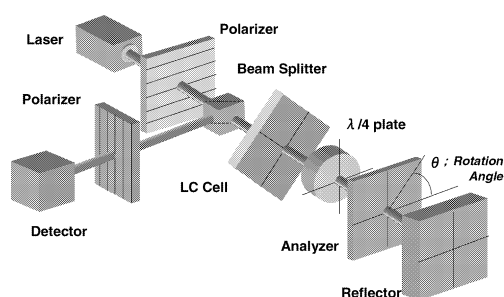


Fig. 11 新たに提案する測定系

た。以上のこのことから、新しい測定法の理論が正しいことが確認された。また、通常は反射型を用いて液晶セルに光を入射させると、鏡によって液晶セル内を光が二度通過するためリタデーションは2倍の値を示すが、この測定法では液晶セルと鏡の間に検光子があるため、光の往復の特性を掛け合わせた値を示すことが分かった。

しかしながら、Fig. 7のような光学系では光学素子の軸合わせやメンテナンス、光源とディテクターの角度による測定値の補正など、いくつかの問題が予想されるため、これらの解決策として Fig. 11 に示すような、新たに考案した光学系を提案する。この光学系では偏光子と測定試料の間にビームスプリッターを組み込ませて

いるため、光学素子の軸合わせが簡便になるとともに、光源とディテクターを分けて配置しているため、上述のような問題も起こらず、有用性が高い方法である。

6. 結 論

セナルモン法を応用した新しいリタデーション測定法について提案した。この測定法を用いることで従来のセナルモン法に比べ2倍の測定点を得られ、読み取り誤差に関わる偶然誤差を少なくすることが可能である。本測定法はより一層正確な測定精度を得ることができ、LCDの性能向上に寄与することができる。

謝 辞

本研究の一部は独立行政法人科学技術振興機構からの受託事業である青森地域結集型共同研究事業として行われたものである。

参 考 文 献

- [1] 例えば：応用物理学会光学懇話会編著：“結晶光学”，(森北出版，1986)。